

落石防護網に使用するひし形金網の実規模載荷実験

その他（別言語等） のタイトル	Full scale test of the diamond-shaped wire net to use for a rockfall protection nets
著者	今野 久志, 西 弘明, 荒木 恒也, 加藤 俊二, 小室 雅人
雑誌名	鋼構造年次論文報告集
巻	23
ページ	650-656
発行年	2015-11
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009706

落石防護網に使用するひし形金網の実規模載荷実験

Full scale test of the diamond-shaped wire net to use for a rockfall protection nets

○今野 久志* 西 弘明** 荒木 恒也*** 加藤 俊二**** 小室 雅人*****
Hisashi KONNO Hiroaki NISHI Nobuya ARAKI Syunji KATO Masato KOMURO

ABSTRACT This study aims at elucidating the functions required of rockfall protection structures (i.e., nets and fences) with high-energy-absorption capacities, which have been increasingly adopted in recent years, and also at establishing a technique to verify the performance of such structures. Static loading tests and falling-weight impact tests were performed for analyzing the behavior of conventional pocket-type rockfall protection nets with the aim of calculating the amount of energy absorbed by diamond-shaped wire net as well as of identifying a constitutive law for materials that was applicable to numerical analysis of energy absorption.

Keywords : 落石防護網, ひし形金網, 実規模載荷実験, 静的載荷実験, 重錘落下衝撃実験
rockfall protection nets, diamond-shaped wire net, full-scale loading test, static loading test, falling-weight impact test

1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路には、落石災害を防止するための様々な落石対策工が数多く建設されている。落石対策工の一つに、吊りロープや支柱、金網、ワイヤロープ等の部材を組み合わせたポケット式落石防護網がある。ポケット式落石防護網は、経済性や施工性に優れており、規模の比較的小さい落石に対して適用されている。従来型のポケット式落石防護網の設計は落石対策便覧¹⁾を参考に、構成部材の吸収可能エネルギーおよびエネルギー差を用いて行われているが、落石衝突に対する応答メカニズムの解明やエネルギー収支という観点から行われた検討事例²⁾はごく限られている。また、近年では緩衝装置等を組み込んだ高エネルギー吸収型と呼ばれる落石防護網が開発され、経済性や落石エネルギーに対する適用範囲の広さから、現場適用事例が増えている。しかしながら、それらの落石防護構造物としての性能評価については、主として実験的検証により行われている事例^{3)~7)}が多いようである

が、実験も開発者独自の手法で実施されており、性能評価に関する統一的な指標もないのが現状である。

このような背景のもと、著者らは従来型ポケット式落石防護網も含めて、落石防護網等の落石対策工として求められる機能の明確化と性能照査技術の確立に向けた検討を行っている。過年度には、エネルギー吸収機構の解明という観点から現地設置状況をできるだけ再現した従来型ポケット式落石防護網の実規模衝撃実験^{8),9)}を実施している。

本稿では、従来型ポケット式落石防護網の構成部材の一つであるひし形金網に着目し、素線径の異なる金網の数値解析における材料構成則等を検討することを目的に静的載荷実験を実施するとともに、重錘落下衝撃実験を実施して、重錘の入力エネルギーを変化させた場合や重錘落下時における回転エネルギーの有無による耐衝撃挙動について検討を行ったのでその概要について報告する。

*博(工) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

**博(工) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

*** 土木研究所 寒地土木研究所 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

**** 土木研究所 つくば中央研究所 土質・振動チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

*****博(工) 室蘭工業大学 大学院工学研究科 准教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第2種正会員

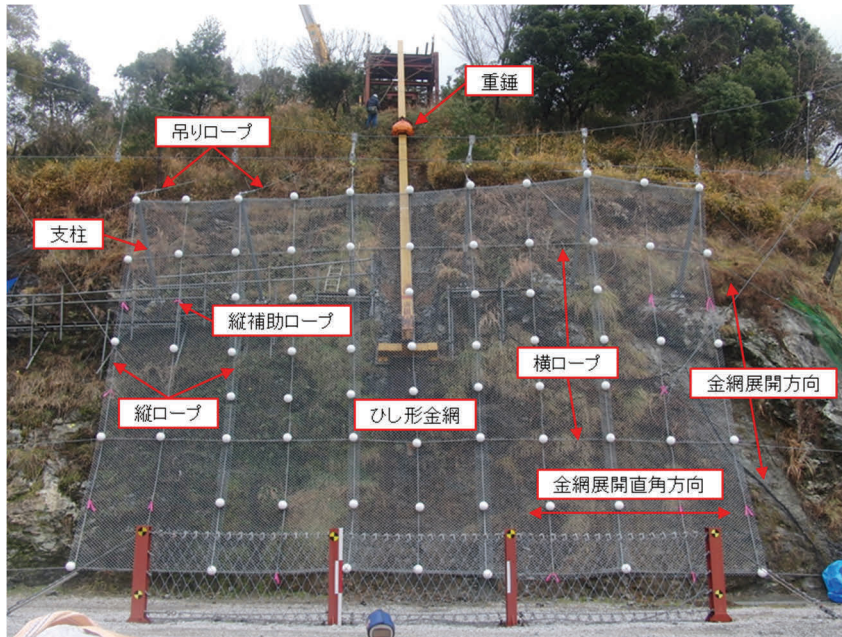


写真1 過年度に実施した従来型ポケット式落石防護網の実規模衝撃実験における試験体設置状況

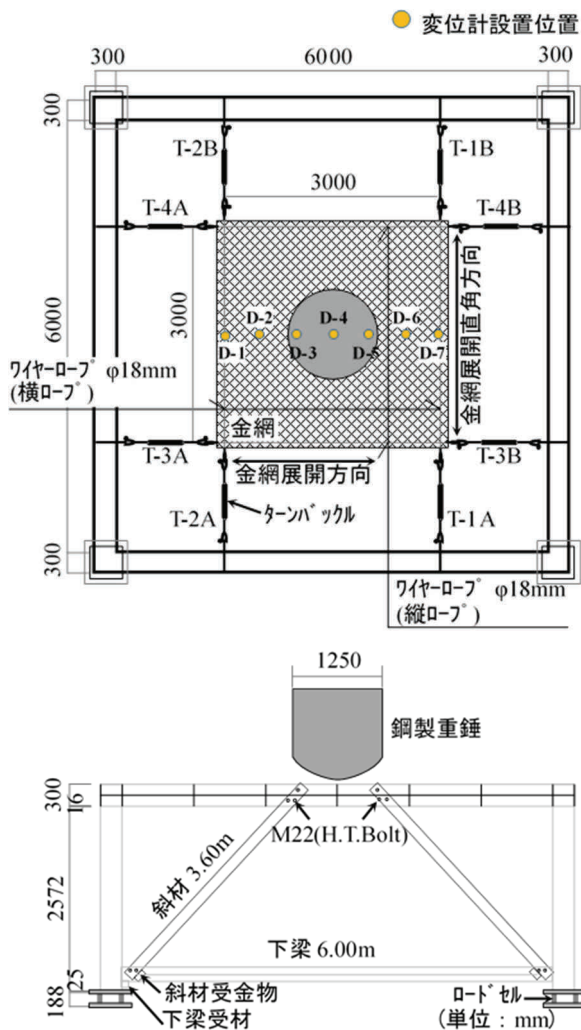


図1 実験装置および試験体の概要



写真2 ひし形金網の構成

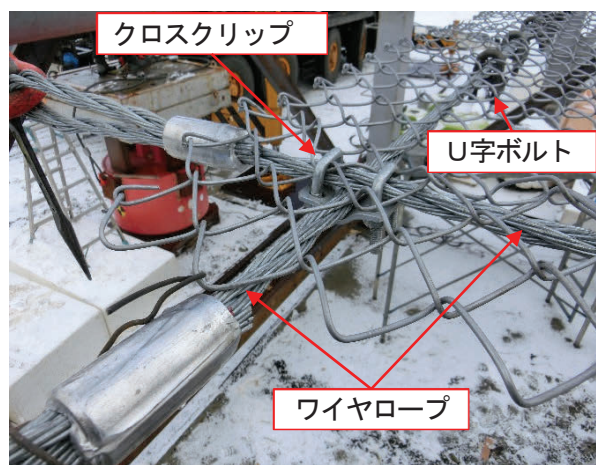


写真3 試験体の構成部材1

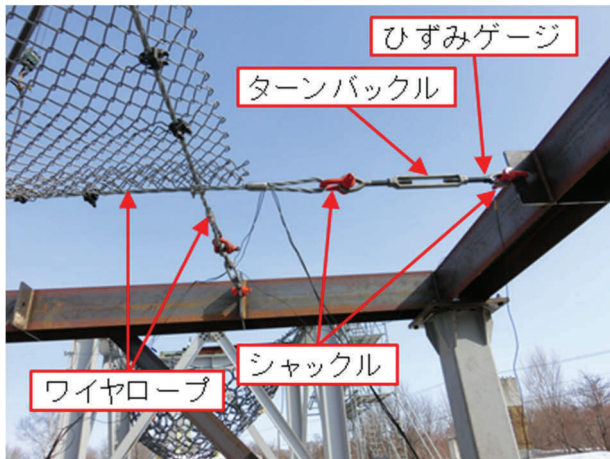


写真4 試験体の構成部材2



写真5 静載荷実験状況

2. 静的載荷実験

2. 1 実験概要

写真1には、過年度に実施した従来型ポケット式落石防護網の実規模衝撃実験⁸⁾の試験体設置状況を示している。試験体の形状寸法は、金網高10 m、金網幅15 m、支柱高3.5 m、支柱間隔3 mである。支柱上部には斜面から支柱を支えるための吊りロープが設置されており、支柱より鉛直方向に吊り下げられたワイヤロープが縦ロープである。縦ロープ間には縦補助ロープが設置されている。水平方向に配置されているワイヤロープが横ロープである。これらの縦・横ロープに固定されるひし形金網は写真2に示すように山形に折り曲げられた列線（1本の列線を黄色で示す）を互いに交差させることで構成されている。列線を組み合わせた金網は、編み込みの向きにより主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向を有する異方性材料である。写真1に示すような現地設置状況では、展開方向が鉛直方向、展開直角方向が水平方向である。列線の長さは3.3 mであり3 m間隔の縦ロープ間で0.15 mのラップ長で両脇のスパンの金網とともに縦ロープに結合コイルで固定されている。

本研究では、従来型ポケット式落石防護網の最小構成部材である縦横各2本のワイヤロープとひし形金網を試験体として、素線径の異なるひし形金網の数値解析における材料構成則等を検討することを目的に静的載荷実験や重錘落下衝撃実験を実施して、基礎的なデータの収集を行った。なお、本実験では試験体を水平に設置して実施しているが、現地設置状況と同様にひし形金網の設

表1 部材の諸元

部材名	諸元 部材耐力(規格値)
ひし形金網	3.2 φ × 50 × 50mm 引張強さ: 386 (290~540) N/mm ²
	4.0 φ × 50 × 50mm 引張強さ: 389 (290~540) N/mm ²
	5.0 φ × 50 × 50mm 引張強さ: 387 (290~540) N/mm ²
ワイヤロープ	18 φ 3 × 7G/O 両端アルミロック 破断荷重: 206 (≥ 160) kN
ターンバックル	両アイ型 1 × 12 ねじ径W=1 公称破断荷重: 222 (一) kN

置方向に対応させてワイヤロープを便宜的に縦ロープと横ロープに区別して整理している。

図1には、実験装置および試験体の形状寸法を示している。実験は、H形鋼で構成される6 m四方の鋼製枠内に3 m間隔で縦横それぞれ2本のワイヤロープを設置し、ワイヤロープで囲まれる3 m四方の領域にひし形金網(3.6 m × 3.3 m)を設置して実験を行っている。ひし形金網には素線径の異なる3種類(3.2, 4.0, 5.0 φ)を、ワイヤロープには18 φを用いている。金網とワイヤロープとの接続は、写真3に示すように25 cmピッチで配置したU字ボルトを用いて固定しており、ワイヤロープの交点はクロスクリップで固定した。また、ワイヤロープは両端アルミロックとしている。ワイヤロープは、写真4に示すようにシャックルとターンバックルを介して鋼製枠にピン接合に近い状態で固定されている。表1には、試験体を使用した部材の諸元を示している。

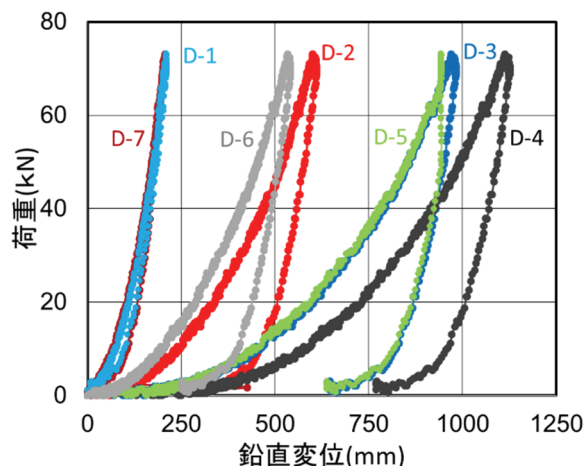


図2 荷重－変位関係（素線径 3.2 mm）

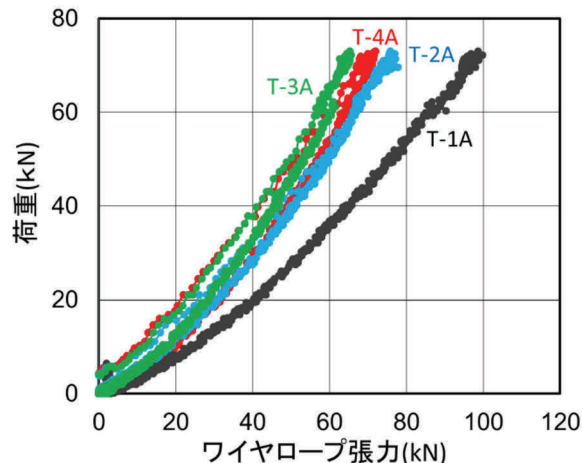


図3 荷重－ロープ張力関係（素線径 3.2 mm）



写真6 固定部の局所変形状況



写真7 実験終了後の金網の状況

2. 2 実験方法

写真5には、実験状況を、図1には重錘載荷位置および変位計設置位置を示す。実験は、H形鋼で構成される鋼製枠架台に水平に設置した試験体に、トラッククレーンで吊り下げた重錘により静載荷させて実施した。載荷には、質量 10 t（直径 1.25 m、高さ 95 cm、底部より高さ 30 cm の範囲が半径 1 m の球状）の重錘上部に鉛部材を設置し、総質量を約 22 t に調整して使用している。本実験における測定項目は、重錘吊り下げ用のワイヤロープに取り付けたロードセルによる載荷荷重、架台の 4 本の支柱基部に設置したロードセルによる鉛直方向反力、ワイヤロープ端部のターンバックルに貼付したひずみゲージによるロープ張力、ワイヤ式変位計による金網の鉛直変位である。載荷位置は、金網中央の 1 箇所とした。なお、ワイヤロープには約 10 kN の初期張力を導入している。

2. 3 実験結果及び考察

2. 3. 1 金網鉛直変位

図2には、3.2 φ 金網のケースにおける載荷荷重と金網の鉛直変位の関係を示す。図より、載荷点直下の測定点である D-4 に着目すると、載荷初期（数 kN 程度まで）においては、荷重の増加に対して変位の増加が大きいが、その後はみかけの剛性が大きくなり、変位増分が徐々に小さくなっていることがわかる。なお、載荷途中では U 字ボルトのすべり等によるものと考えられる荷重の微増減を伴っている。本ケースでは、最大荷重時点で載荷点部近傍における金網に破断等が生じてはいなかったが、金網とワイヤロープの固定部の局所的な変形状況（写真6）やロープ張力等から判断して、約 75 kN（変位約 1,100 mm）までの載荷とした。この荷重－変位関係から、本実験条件における金網とワイヤロープから構成される構造体の最大荷重作用時点までの吸収可能エネルギー

ギ一量は、載荷点直下 D-4 の荷重－変位関係の履歴曲線に囲まれる面積より約 20 kJ と算定される。なお、写真 7 は重錘を撤去した実験終了後の金網の状況を示している。載荷点近傍の金網は塑性変形により重錘形状がそのまま残っており、除荷時の残留変位は 750 mm 程度であった。載荷点以外の測定点に着目すると、重錘中心から 1 m 離れた点 (D-2, D-6) の鉛直変位は約 500 mm, 残留変位は 250 mm 程度であった。一方、ここでは示していないが、金網の素線径が太い場合 ($\phi 4.0$, $\phi 5.0$) には、金網の見かけの剛性が大きくなる傾向にあるが、変形性状については、 $\phi 3.2$ のケースと類似なものであることを確認している。

2. 3. 2 ワイヤロープ張力

図 3 には、同様に 3.2 ϕ 金網のケースにおける載荷荷重とワイヤロープ張力の関係を示す。なお、各ロープで両端の張力がほぼ等しかったことから、片側の値で代表している。図より、載荷初期 (載荷荷重 10～15 kN) には荷重の増加は緩やかであるが、それ以降の荷重とロープ張力はほぼ線形関係にあることがわかる。ロープの最大張力に着目すると、T-1A が 100 kN と他の張力に比較して大きな状態となっている。これは、金網の異方性 (網目の向き) の影響に加えて、載荷点が T-1 ロープ側に偏心してしまったことによるものと考えられる。ここでは示していないが、この金網の異方性の影響は、他の実験ケースにおいても明確に現れていることを確認している。

3. 重錘落下衝撃実験

3. 1 実験概要

重錘落下衝撃実験を実施した実験装置および試験体は図 1 に示すとおり、静的載荷実験と同一である。

3. 2 実験方法

写真 8 には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。また表 2 には、実験ケース一覧を示している。実験では、衝突エネルギーが異なる場合および重錘の回転エネルギーの影響を検討している。ここで、表中の落下高は重錘落下点の金網表面から重錘底面までの高さであり、衝突エネルギーはその高さより算定した重錘の位置エネルギーである。重錘に回転を与える実験は、多面体重錘に荷吊り用の帯を巻き付け自由落下時に回転を与えている。計測項目は、ターンバックルに貼付し



写真 8 衝撃実験の状況

表 2 実験ケース一覧

実験ケース名	金網 (mm)	重錘 (kN)	落下高 (m)	衝突エネルギー(kJ)		
				並進	回転	合計
D3.2W3H5	3.2	3	5.0	14.7	—	14.7
D3.2W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D3.2W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D4.0W3H5	4.0	3	5.0	14.7	—	14.7
D4.0W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D4.0W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D5.0W3H5	5.0	3	5.0	14.7	—	14.7
D5.0W3H7.5			7.5	22.1	—	22.1
D5.0W3H10			10.0	29.4	—	29.4
D3.2W3H10R	3.2	3	10.0	25.6	3.8	29.4
D4.0W3H10R	4.0			26.1	3.3	29.4
D5.0W3H10R	5.0			26.1	3.3	29.4

たひずみゲージによるロープ張力、高速度カメラ撮影による金網の載荷点直下の鉛直変位量である。なお、表 2 に示す回転エネルギーは、高速度カメラ映像により算定した値であり、回転エネルギーは全エネルギーの 11～13% であった。

3. 3 実験結果および考察

3. 3. 1 各種応答波形

図 4 (a), (b) には、一例として実験ケース D5.0W3H10 における金網の載荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形を示している。ここで、ロープ張力に関しては前述のとおり金網の設置方向を考慮し、現地設置状況に合わせて便宜的にワイヤロープを縦ロープおよび横ロープと区別して記述している。

(a) 図より、載荷点変位は重錘衝突後急激に増加し 0.11 sec 後に最大変位 1.12 m に達した後、リバウンドしながら上下動を繰り返し、最終的に 0.8 m 程度の残留変位が発生している。

(b) 図より、ロープ張力は、金網の載荷点変位波形に対応した波形性状を示しており、載荷点変位

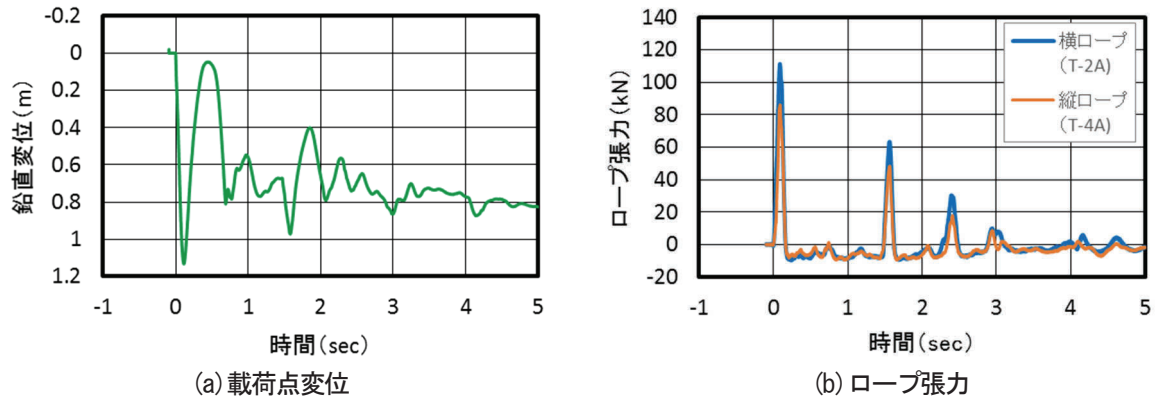


図4 金網の載荷点変位およびロープ張力の時刻歴応答波形 (D5.0W3H10)

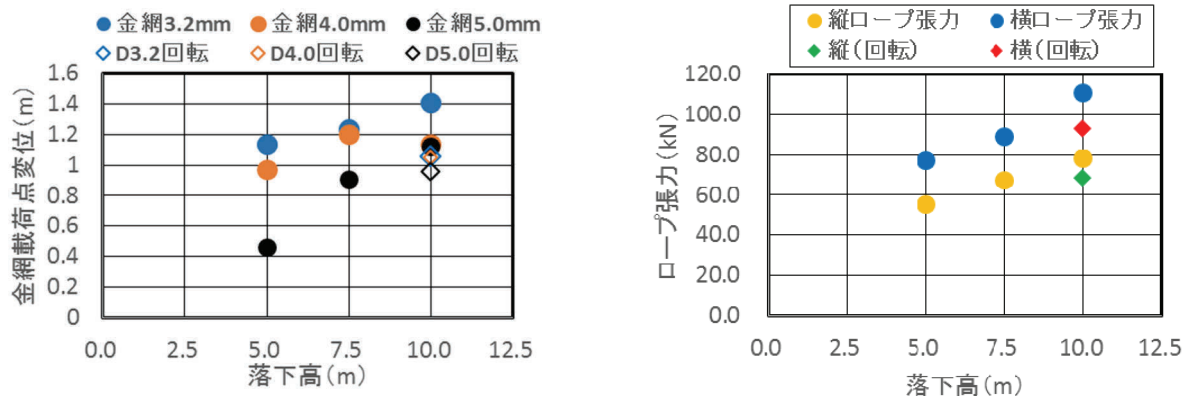


図5 落下高と載荷点変位の関係

のピーク発生時点において各ロープ張力においてもピーク値が示されている。最大張力に関しては、横ロープが縦ロープに比較して30%程度大きな値を示している。これは、ひし形金網の異方性により、重錘衝突時における金網の変形に伴い、横ロープの方がより大きく載荷点側に引き寄せられるためと推察される。

3. 3. 2 入力エネルギーと金網の最大変位、ワイヤロープの最大張力の関係

図5には、重錘落下高と金網の載荷点変位の関係を示している。素線径4.0mmの落下高7.5mにおける変位量が若干大きく示されているがその他の実験ケースでは落下高の増加に対応して載荷点変位も増加する傾向が示されている。また、素線径で比較すると、素線径が小さいほど変位量は大きくなる傾向が示されている。回転有りの実験では、素線径3.2mmの実験において、重錘が角部より衝突したことから素線が破断し重錘が貫通したために、回転無しの変位量よりも25%程度小さく示されている。素線径が4.0mm, 5.0mmでは、回転有りの場合は並進エネルギーが減少す

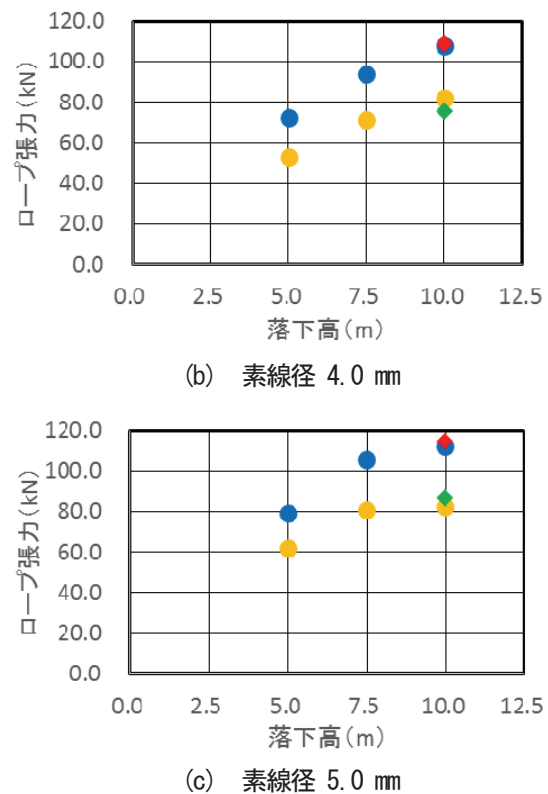


図6 落下高とロープ張力の関係

るため、回転無しに比較してそれぞれ 8%および 14%程度変位量が小さい。

図6には、重錘落下高とロープ張力の関係を示している。ロープ張力は、重錘衝突位置の誤差等を考慮し、縦・横ロープそれぞれの平均値を採用した。いずれの索線径においても落下高の増加に対応して張力が増加している。また、横ロープの張力が縦ロープに比較して 20~30%程度大きくなっている。重錘の回転の影響に関しては、3.2 mm では重錘が貫通したため回転させた場合が小さく示されているが、それ以外の実験ケースについては両者ほぼ同程度の張力となっている。

4. まとめ

本研究では、従来型のポケット式落石防護網の構成部材のエネルギー吸収量の算定や数値解析における材料構成則等の設定を目的として、実規模の静的載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施した。本実験の範囲内で明らかとなったことを整理すると、以下ようになる。

・静的載荷実験より

1) 索線径 3.2 mm のひし形金網に対する 75 kN 載荷時の載荷点変位は約 1,100 mm であり、この時点までの吸収可能エネルギー量は約 20 kJ と算定される。

・重錘落下衝撃実験より

2) 金網の載荷点変位およびロープ張力は、落下高の増加に対応して大きくなり、索線径が小さいほど変位量は大きくなる。また、ロープ張力は横ロープの方が縦ロープよりも大きい。

3) 全衝突エネルギーが同一の場合、重錘の回転が有る場合は、並進エネルギーが減少するため、回転無しに比較して載荷点変位は小さく示される傾向にある。一方、ロープ張力に関しては明瞭な違いは見られなかった。

今後は、全衝突エネルギーに対する回転エネルギーの割合がさらに大きな場合について実験を実施し、回転の有無による影響について詳細に検討したいと考えている。

【参考文献】

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 原木大輔，香月 智，田代元司：円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，土木学会論文集 A，Vol.65 No.2，pp.536~553，2009.6
- 3) 窪田潤平，中村浩喜，吉田 博：特殊ひし形金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について，構造工学論文集，Vol.54A，pp.11~22，2008.3
- 4) 高橋利延，山本佳士，香月 智，高森 潔：落石防護網のエネルギー吸収性能の評価に関する実験的検討，第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2013.3
- 5) 下条和史，渡辺達男：高エネルギー対応落石防護網の開発とその安全対策工としての適用性，第 61 回平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.68~69，2012.5
- 6) 加賀山肇，奥村昌史，右城猛：新しい落石防護ネットの開発，平成 22 年度地盤工学会四国支部技術研究発表講演概要集，2010.10
- 7) 田島与典，前川幸次，岩崎征夫，河上康太：実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価，構造工学論文集，Vol.56A，pp.1088~1100，2010.3
- 8) 山口 悟，今野久志，西 弘明，佐々木哲也，小室雅人：従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験，鋼構造年次論文報告集，巻 21 巻，pp.104-110，2013.11
- 9) 山口 悟，今野久志，西 弘明，加藤俊二，小室雅人：落石防護網の実規模模型実験，鋼構造年次論文報告集，巻 22 巻，pp.137-143，2014.11